

DOI:10.11937/bfyy.201516045

# 臭氧污染对园艺作物影响的研究述评

张 璐, 贾 丽 丽, 隋 佳 欣, 张 悦, 陈 雅 君

(东北农业大学 园艺学院, 黑龙江 哈尔滨 150030)

**摘 要:**臭氧是对流层空气中的主要污染物之一,严重影响着人体健康和动植物的生长发育。现系统总结了臭氧污染的产生及发展,臭氧对园艺作物叶片可见伤害、生长及生理、开花与结实、产量与产品品质等方面的影响,同时对园艺作物的臭氧敏感性差异及其机理进行了整合分析,探讨了园艺作物用作臭氧指示植物的潜力,归纳了臭氧污染伤害的防治方法和途径,并对今后园艺作物响应臭氧胁迫研究做了展望。

**关键词:**臭氧;园艺作物;述评

**中图分类号:**S 6-33 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2015)16-0188-08

对流层中的臭氧(O<sub>3</sub>)主要是氮氧化物(NO<sub>x</sub>)和挥发性有机物(VOCs)等一次污染物经过光化学反应而形成的<sup>[1]</sup>。随着工业发展以及汽车保有量的迅速增加,NO<sub>x</sub>浓度不断升高,进而导致空气中臭氧浓度日益升高。研究发现,由于人类活动导致对流层臭氧浓度在过去40年间增加了2~5倍<sup>[2]</sup>。若维持当前NO<sub>x</sub>的排放速率,预计2015—2050年全球地表O<sub>3</sub>浓度将在现有基础上增加20%~25%,21世纪末将增加40%~60%<sup>[3]</sup>。

臭氧会对人类和动物健康以及农林业生产活动造成严重危害<sup>[4-5]</sup>。通过模型估算,由于臭氧污染导致的全球粮食产量损失为7 900万~12 100万t,价值110亿~180亿美元<sup>[6]</sup>。在日常生活中占有重要地位的园艺作物同样面临着臭氧污染的威胁。

## 1 臭氧污染对园艺作物的可见伤害

作为一种气体污染物,臭氧对植物影响最直接的表现是植物地上部分的变化。叶片是植物进行气体交换的主要场所,因此叶片往往最先反映出臭氧胁迫对植物的伤害程度。随着我国空气臭氧浓度的升高及臭氧污染发生频率的增加,总结园艺作物在臭氧胁迫下的可见伤害,找到其发生发展规律显得尤为重要。

甜瓜品种‘Superstar’在环境臭氧浓度下已经出现

了叶片可见伤害<sup>[7]</sup>。环境臭氧浓度下,随着时间的延长西瓜叶片伤害逐渐发生变化,最初出现褪绿斑,紧接着出现斑点、叶片变白及坏死等症状<sup>[8]</sup>。有学者对环境臭氧浓度下北京市重要植物的可见伤害进行了系统观察,发现豆科蔬菜(如菜豆、刀豆及豇豆)伤害比较普遍,西瓜、冬瓜、丝瓜等葫芦科植物及桃、葡萄等果树也出现症状,观赏植物中日本牵牛花、悬铃花、地锦等也有可见伤害出现。这些园艺作物受害症状多为叶脉间出现不同颜色的斑点<sup>[9]</sup>。大叶醉鱼草在环境臭氧浓度下没有可见伤害出现,而当环境臭氧浓度加倍后叶片出现受害症状<sup>[10]</sup>。在环境臭氧浓度及臭氧浓度升高处理下,番茄所有试验品种均可看到臭氧特异性可见症状<sup>[11]</sup>。臭氧浓度升高(90 nL/L)对小白菜、甘蓝型油菜、叶用芥菜、茼蒿及茼蒿均造成可见伤害,但症状不同,如白色斑点、黄色斑点等<sup>[12]</sup>。臭氧胁迫下苹果幼苗叶片下表皮出现棕色斑点,而上表皮呈现浅黄色的花叶斑<sup>[13]</sup>。

相同的臭氧污染程度下,不同种(品种)植物的可见症状出现时间、类型及面积可能会有很大差别。有学者研究了急性臭氧暴露(150 nL/L, 3 h)对白三叶和红三叶的影响,发现在臭氧熏蒸结束后24 h,仅有红三叶出现可见伤害<sup>[14]</sup>。与甘蓝型油菜、叶用芥菜、茼蒿及茼蒿等蔬菜相比,同样浓度的臭氧污染(90 nL/L)下小白菜最早出现受害症状。经过3周的臭氧污染,大叶醉鱼草品种‘Pink Delight’的叶片受害比例最大,约为46.2%;其次为‘Opera’,约23.3%的叶片受害;其它3个品种的伤害面积类似,均不足15%<sup>[10]</sup>。臭氧污染对植物的可见伤害也与臭氧浓度及暴露时间相关。随着臭氧浓度增加或暴露时间的延长,可见症状的面积增加,有时症状也会发生改变,例如几种常见叶菜类蔬菜(小白菜、甘蓝型油菜、叶用芥菜、茼蒿、茼蒿)的叶片受害面积随着污

**第一作者简介:**张璐(1982-),男,山东宁阳人,博士,副教授,现主要从事园林植物生理生态学等研究工作。E-mail:caszhanglu@hotmail.com.

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(31401895);黑龙江省自然科学基金资助项目(C201221);黑龙江省教育厅科技资助项目(12521013);东北农业大学博士启动资助项目(2012RCB36);东北农业大学‘青年才俊’资助项目(14Q10)。

**收稿日期:**2015-05-21

染时间的延长而增加<sup>[12]</sup>。臭氧对植物的可见伤害还与植物叶片的生长时期相关,甚至同一植株不同叶龄叶片的伤害症状也可能会有很大差别。环境臭氧浓度下,西瓜老叶的可见伤害比新叶多<sup>[8]</sup>。

## 2 臭氧污染对园艺作物生长、生理活动的影响及其分子机理

### 2.1 臭氧浓度升高对园艺作物生长及生物量的影响

臭氧污染会导致植物的生长速度变缓,生物量降低,生物量分配发生改变<sup>[15]</sup>。园艺作物对臭氧浓度升高的响应也与这一规律基本一致,但存在一些特例。高浓度臭氧(250 nL/L)熏蒸导致番茄植株节间生长速度下降,植物生长延迟,有限的干物质更多的向植株地上部位分配,总根长和根数减少<sup>[16]</sup>。环境臭氧浓度加倍处理导致大叶醉鱼草生长指数降低了6%,干重降低了35%<sup>[10]</sup>。2个月的慢性臭氧污染(78 nL/L)使草莓的叶片数量减少,导致其叶面积和比叶面积降低,叶片总面积的降低导致光合作用受到损害,最终导致生物量的降低。以根系生长减少为代价,生物量优先向地上部分分配<sup>[17]</sup>。对于叶片用做蔬菜的番薯品种来说,臭氧污染导致其生物量往地上冠层分配,而抑制了地下块茎的发育<sup>[18]</sup>。臭氧浓度升高导致菠菜和青菜地上和地下生物量显著降低,当 $O_3$ 浓度达200 nL/L时,地上生物量分别不足对照的1/9和1/3,地下生物量分别下降79.8%和69.3%<sup>[19]</sup>。臭氧胁迫导致甘蓝型油菜、叶用芥菜、茼蒿、茼蒿几种叶菜类蔬菜的地上生物量(产量)有不同程度的降低,也导致4个小白菜品种的地上生物量(产量)有不同程度的降低<sup>[12]</sup>。高浓度臭氧导致5个番茄品种根系生物量均降低<sup>[11]</sup>。但也发现一定浓度(200 nL/L)的臭氧极短时间(2 min)多次处理反而促进了番茄的生长及干物质的积累<sup>[20]</sup>。

除了臭氧浓度外,臭氧污染对植物生长的影响还与作物发育时期有关。250 nL/L的臭氧熏蒸下,番茄幼龄植株(30 d)和老龄植株(51 d)的根系生长均受到抑制,其中幼龄植株发生根系抑制较早,但持续时间较短。在臭氧处理结束后幼龄植株恢复的更好,可能与这一时期没有坐果有关<sup>[16]</sup>。

### 2.2 臭氧污染对园艺作物生理活动的影响

臭氧通过气孔进入植物体后,会影响叶片的叶绿素含量、气体交换以及光系统II的活性,进而影响碳水化合物的合成<sup>[21]</sup>。臭氧污染导致番茄冠层不同高度的叶片叶绿素含量均降低。随着臭氧浓度升高,降低程度加重。臭氧处理结束后,经过一段时间,中上部叶片的叶绿素得到恢复而下层老叶恢复不明显<sup>[22]</sup>。臭氧污染下我国常见的几种叶菜类蔬菜(甘蓝型油菜、叶用芥菜、茼蒿、茼蒿)以及几个小白菜品种的光合速率和气孔导度

均有不同程度的降低<sup>[12]</sup>。大气 $O_3$ 浓度升高导致菠菜和青菜气孔阻力增大,光合作用速率下降<sup>[19]</sup>。慢性臭氧污染(78 nL/L)使草莓品种'Elsanta'老叶的Rubisco酶活性及叶绿素含量显著降低,叶片的碳水化合物含量降低<sup>[17]</sup>。随着臭氧浓度的升高,菜豆敏感性基因型S156叶片的 $Fv/Fm$ 值有下降趋势, $qP$ 值显著降低<sup>[23]</sup>。随着臭氧浓度的升高,番茄叶片光系统II运行效率及其光化学最大量子效率均降低,表明光系统II活性受到臭氧的抑制,进而导致了光合速率的降低<sup>[24]</sup>。急性臭氧胁迫下,2个番茄基因型的非光化学淬灭系数( $qNP$ )和光系统II反应中心关闭程度( $1-qP$ )增加,而光系统II光化学量子效率( $\Phi PSII$ )和激发态能量捕获量子效率( $\Phi exc$ )降低,进而降低了光合速率<sup>[25]</sup>。有学者研究发现臭氧暴露导致番茄植株光合速率的降低是气孔和非气孔限制共同所致,而植物通过叶黄素循环的方式热耗散掉多余能量保护光系统<sup>[26]</sup>。另外,臭氧还能影响园艺植物倒挂金钟和蚕豆的呼吸作用<sup>[27]</sup>。臭氧对园艺作物生理活动的影响受到作物发育时期的限制。黄韵珠等<sup>[28]</sup>研究了 $O_3$ 对不同发育时期的辣椒光合作用的影响,结果表明, $O_3$ 能抑制辣椒的光合作用,抑制程度为花期>苗期>蕾期>果期。

臭氧胁迫会导致植物叶片的活性氧分子增加,进而影响植物的抗氧化系统<sup>[29]</sup>。短期中等臭氧浓度暴露下,番茄果实的自由基含量显著高于过滤空气下的<sup>[30]</sup>。臭氧胁迫下,活性氧分子增加,叶绿素含量降低,脂质过氧化及蛋白羰基化水平增加,抗氧化酶活性以及多酚和硫醇基含量降低<sup>[31]</sup>。急性臭氧暴露(150 nL/L),3 h后,白三叶和红三叶的抗氧化酶(过氧化物酶和抗坏血酸过氧化物酶)的活性均有不同程度的降低<sup>[14]</sup>。

臭氧对园艺作物生理活动的影响受到作物发育时期及臭氧浓度的制约。从叶片蔗糖和叶绿素含量来看,油菜在开花期对臭氧最敏感。相同臭氧剂量时,与长时间中等浓度相比,短时间高臭氧浓度处理下甜菜和油菜叶片蔗糖和叶绿素含量的降低程度更大<sup>[32]</sup>。

### 2.3 臭氧污染对园艺作物影响的分子机理

臭氧胁迫对园艺作物影响的分子机理研究多侧重于植物的叶片抗氧化、叶片衰老等过程。高浓度臭氧(300 nL/L)胁迫6 h后,白菜型油菜 $BcMdhar$ 基因的mRNA水平增加了1.4倍,处理10 h后,转录量达到峰值(为处理前的1.9倍),而处理12 h后转录量减少<sup>[33]</sup>。臭氧污染下,番茄乙烯不敏感型突变体及其近等基因野生型品种具有相似的敏感性,茉莉酸合成及超敏反应诱导基因的转录在品种间基本一致。突变体的乙烯不敏感特性促进了水杨酸积累,导致细胞死亡,进而导致茉莉酸积累量的减少;野生型品种中,尽管没有水杨酸的积累,但是高浓度乙烯和过氧化氢引起茉莉酸积累较

多<sup>[34]</sup>。将番茄永不成熟突变体及其野生型品种暴露在急性 O<sub>3</sub> (200 nL/L) 中 4 h, 发现 2 个品种具有类似的臭氧敏感性, 臭氧引起了依赖 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 的氧化爆发, 诱导了乙烯产生, 激活了茉莉酸的生物合成和诱导基因。乙烯受体 le-etr3(NR) 保留了对乙烯的部分敏感性, 说明在调控植物响应 O<sub>3</sub> 的复杂过程中, NR 受体只有很小的作用<sup>[35]</sup>。在臭氧处理 1~5 h 内, 番茄叶片 ACC 合成酶、ACC 氧化酶及乙烯受体基因的 mRNA 水平发生改变。臭氧诱导的乙烯合成分为 2 个阶段, 过氧化氢的产生及细胞死亡均需要乙烯合成, 乙烯与过氧化氢爆发共同调控细胞死亡程度<sup>[36]</sup>。从臭氧胁迫下的番茄幼苗中分离出 3 个差异表达的 cDNA, 并分析了这些 cDNA 在臭氧敏感性差异品种中的表达水平。涉及到抗氧化、受伤及发病反应的大量基因在品种间的差异可能导致了臭氧敏感性差异<sup>[37]</sup>。O<sub>3</sub> 浓度升高降低了番茄植株营养物质可溶性糖和氨基酸的含量, 提高了水杨酸含量、发病相关蛋白(PR) 基因表达量和次生代谢产物(总酚和缩合单宁) 含量, 从而降低以这些番茄植株为食物的白粉虱的适合度, 例如发育时间延长, 产卵力和内禀增长率降低<sup>[38]</sup>。

臭氧响应基因不仅受到臭氧暴露周期和剂量的影响, 还受到植株生长状况的影响。另外, 基因表达的变化受到与环境相关的其它因素的影响<sup>[37]</sup>。

### 3 臭氧污染对园艺作物开花、结实及产量的影响

作物的繁殖活动最易受到外界环境变化的干扰。环境臭氧浓度加倍处理导致大叶醉鱼草花芽和花序数量降低了 29%<sup>[10]</sup>。在臭氧污染发生的第 2 个生长季中, 黑莓开花期提前, 早期开花数量增加, 且更早进入盛花期<sup>[39]</sup>。臭氧处理下风铃辣椒的果实数量及重量均显著降低<sup>[31]</sup>。与过滤空气条件相比, 环境空气未经过滤下甜瓜的商品果重量和数量均显著减少<sup>[7]</sup>。臭氧浓度升高导致番茄成熟和未成熟的果实数量普遍减少<sup>[11]</sup>。环境臭氧浓度及臭氧浓度加倍处理下, 尽管黑莓果实数总量没有显著变化, 但成熟果实及大果的数量减少<sup>[39]</sup>。与过滤空气相比, 生长期的环境臭氧浓度导致西瓜产量降低, 这与光饱和净光合速率和气孔导度的降低以及暗呼吸的增加相关<sup>[40]</sup>。但是也有学者发现一定浓度的臭氧处理有利于作物结实。臭氧处理可促进大棚甜瓜单果质量增加, 其中低剂量处理单果质量显著高于对照<sup>[41]</sup>。

臭氧对园艺作物产量的影响与作物的发育时期、臭氧浓度及暴露时间等有着密切的关系。从种子重量来看, 开花期的油菜对臭氧污染最敏感<sup>[32]</sup>。重要发育时期(番茄的开花期和坐果早期) 发生臭氧污染将会在最大程度上影响作物的产量。依赖生长阶段的物候权重可

能在预测臭氧导致的减产上更有效<sup>[42]</sup>。同样剂量条件下, 短时间高浓度臭氧处理对甜菜主根鲜重和油菜种子鲜重的影响最大, 中等浓度长时间处理下的植物从臭氧胁迫中恢复的能力好于高浓度处理<sup>[32]</sup>。菜豆对低于 30 nL/L 的臭氧污染有抗性, 而在 60 nL/L 的 O<sub>3</sub> 下产量显著降低<sup>[23]</sup>。有学者研究了臭氧暴露 4 年中盆栽葡萄对臭氧的吸收及果实产量的变化, 发现臭氧引起的葡萄减产与收获前 2 年的臭氧暴露水平有关<sup>[43]</sup>。

### 4 臭氧污染对园艺作物产品品质的影响

臭氧胁迫下, 园艺作物的商品器官可能会受到影响。观叶植物和叶菜类蔬菜的叶片可见伤害, 黑莓成熟果实和大果的数量减少都会导致其产品品质的降低<sup>[39, 44]</sup>。在臭氧浓度升高条件下, 番茄品种的成熟率均降低, 大部分品种的果实品质降低<sup>[11]</sup>。另外, 暴露在臭氧污染环境, 园艺作物产品的营养物质、内含物质及次生代谢产物的成分及含量可能会发生变化, 进而导致产品品质发生改变。臭氧污染导致叶用番薯种植株的叶片淀粉含量降低, 而类胡萝卜素含量保持稳定; 对于块茎用的番薯来说, 臭氧处理下, 块茎产量及其淀粉含量显著降低, 意味着用于工业加工的产品质量变差, 但更适合作薯片生产<sup>[18]</sup>。甜菜主根的葡萄糖含量及油菜种子的脂肪酸含量在臭氧胁迫下降低<sup>[32]</sup>。与葡萄产量相比, 葡萄汁液品质对臭氧暴露更敏感, 其糖含量主要受到测定当年和前一年臭氧暴露的影响<sup>[43]</sup>。O<sub>3</sub> 浓度升高导致甘蓝型油菜种子和花椰菜的蛋白质含量显著增加。油菜种子中提炼出的菜籽油脂脂肪酸组成也发生了变化: 油酸下降而亚油酸增加。菜籽油中维生素 E 含量的下降是由于 γ-生育酚减少所致。在花椰菜中, 虽然总硫甙浓度没有改变, 但是有部分吲哚硫甙转变成了脂肪硫甙。脂肪硫甙/吲哚硫甙比率增加可能与其抗癌作用有重要关系<sup>[45]</sup>。臭氧污染导致冬油菜种子粗蛋白及油含量等品质指标降低<sup>[46]</sup>。

### 5 园艺作物对臭氧污染的敏感性差异

植物的臭氧敏感性往往通过叶片可见伤害及生物量积累变化来判断。对于园艺作物来说, 商品器官的变化经常作为衡量其敏感性的指标。不同种类园艺作物的臭氧敏感性具有显著差异: 豆类、西瓜、萝卜、番茄、洋葱和莴苣为高度敏感作物, 甜菜、马铃薯、油菜、葡萄及花椰菜为中度敏感作物, 以李子和草莓为代表的果树为不敏感作物<sup>[47]</sup>。急性臭氧暴露(150 nL/L, 3 h) 下, 红三叶的臭氧敏感性比白三叶更高<sup>[14]</sup>。在环境臭氧浓度及环境臭氧浓度 2.5 倍的处理下, 大叶醉鱼草的 2 个品种和小百日菊最敏感, 大叶醉鱼草其它 7 个品种以及美国红枫的 3 个品种仅有轻微的伤害症状, 而在大花四照花、齿叶冬青、枸骨、紫薇、大花六道木、四季秋海棠、矮牵

牛、一串红及千日红中没有见到可见症状<sup>[48]</sup>。有学者发现种源地不同的芬兰野草莓种群对臭氧污染的敏感性存在较大差异。与北部种群相比,南部种群具有更高的臭氧抗性,这可能由于该种源地的背景臭氧浓度较高,植物经过了长时间自然选择的结果<sup>[49]</sup>。同种作物不同品种的臭氧敏感性也可能会有较大差别。慢性臭氧污染(78 nL/L)导致草莓品种‘Elsanta’叶片的碳水化合物含量、叶片及根系中氮含量显著降低,而品种‘Korona’则保持相对稳定的水平,‘Elsanta’的敏感性高于‘Korona’<sup>[17]</sup>。番茄品种对臭氧污染的响应也存在差异:在环境臭氧浓度下,‘Nikita’和‘UC 82 L’的根系生物量减少,‘Nikita’在栽培后期地上生物量降低并且成熟果实的数量减少24%,3个品种(‘Nikita’、‘Moneymaker’和‘Piedmont’)的果实成熟率下降,‘Nikita’和‘Ailsa Craig’的果实品质降低。综合分析发现‘Nikita’是臭氧敏感性品种,‘UC 82 L’和‘Piedmont’更耐臭氧污染,而其它2个品种居于中间位置<sup>[11]</sup>。与二倍体金银花相比,其同源四倍体品种的臭氧抗性较低<sup>[50]</sup>。

作物的臭氧敏感性与其气孔调节能力、抗氧化能力及光合碳同化能力有关<sup>[51]</sup>。臭氧胁迫下,黑樱桃臭氧敏感型半同胞家系(R-12)在叶片可见伤害、气孔导度和净光合速率均显著高于耐O<sub>3</sub>半同胞家系(MO-7)幼苗。这说明与MO-7相比,R-12幼苗对臭氧的吸收较多<sup>[52]</sup>。通过比较研究3个敏感性不同的菜豆基因型(S156, R123和R331)在臭氧污染下光合过程的变化差异,发现进入3个品种叶片的臭氧通量没有显著差别,在臭氧下抗性品种R123能在一定程度上维持Rubisco的活性及光合碳同化,而敏感性品种S156的抗氧化能力及调控Rubisco酶活性的能力均较弱<sup>[23]</sup>。有学者利用7个敏感性不同的菜豆品种来探讨抗氧化物质(抗坏血酸、谷胱甘肽及 $\alpha$ -生育酚)与植物臭氧抗性的关系。总体来说,抗性品种的抗坏血酸含量比敏感品种高,但这种差异并不总是显著。谷胱甘肽及 $\alpha$ -生育酚含量在品种间存在差异,但是与臭氧抗性之间并没有相关性。通过叶片抗氧化物质含量并不能很好的区分抗性敏感品种<sup>[53]</sup>。臭氧胁迫下,番茄病原体敏感品种出现明显伤害症状,而抗病品种没有出现症状;2种基因型的光合能力受到损害,但在熏蒸结束后第2天,抗病品种完全恢复而敏感品种进一步降低;臭氧熏蒸结束后24 h,苯丙氨酸解氨酶和莽草酸脱氢酶仅在抗病品种中显著升高。由真菌病原体诱导的抗性机制可能是抗病品种臭氧抗性较好的原因<sup>[54]</sup>。随后,有学者利用这2个番茄基因型研究其光合作用对急性臭氧污染的响应。抗性品种净光合速率并没有改变,而敏感品种由于气孔关闭导致净光合速率显著降低<sup>[25]</sup>。作物的O<sub>3</sub>敏感性与其叶片解剖结构关系密切。与抗性品种相比,黑樱桃O<sub>3</sub>敏感品种的叶

片气孔密度较大,海绵组织层较厚而栅栏组织较薄,叶面积较大且叶片相对较重,叶片厚度及比叶重较大<sup>[55]</sup>。作物臭氧敏感性受到作物龄期的影响。番茄的臭氧敏感性受到植株龄期制约,幼龄植株更敏感<sup>[24]</sup>。植物臭氧敏感性差异还受到其它环境因素的影响。在相似的臭氧暴露条件下,与非灌溉地块相比,灌溉条件下生长的观赏植物幼苗气体交换速率和受害症状均较大,说明土壤湿度改变了幼苗对臭氧暴露的响应<sup>[56]</sup>。

## 6 园艺作物用作臭氧污染指示植物的潜力

目前对于空气臭氧浓度的监测主要采用精密的专业仪器来进行,并且监测样点多分布在城市人口密集区域。但是我国农村地区同样面临臭氧污染,由于地域面积广大,需要寻找简单方便经济同时又相对准确的监测方法。指示植物是在特殊环境下分布较广泛或者具有不同形态表现的一类植物,能够在一定程度上反映环境特征及变化。园艺作物种类繁多,有些作物品种丰富,为筛选臭氧污染指示植物提供了丰富的资源。菜豆不同基因型对臭氧的敏感性存在较大差异,在目前的环境臭氧浓度下菜豆具有监测空气臭氧效应的潜力<sup>[57]</sup>。有学者利用自由气体浓度增加技术(FACE)测试了当前及未来臭氧浓度下,菜豆臭氧敏感性品种和抗性品种作为O<sub>3</sub>指示植物的可能性。高浓度O<sub>3</sub>(环境臭氧浓度的1.4倍)使敏感性品种的荚果产量减少,但对抗性品种的产量没有显著影响。敏感基因型产量与抗性基因型产量的比值可以作为评价O<sub>3</sub>效应的指标<sup>[58]</sup>。将臭氧、荧蒹和硫酸烟雾单独或结合来模拟空气污染物,了解其对凤仙花的影响,从叶片黄化、坏死和斑点等叶片症状来看,含有臭氧的处理都比其它处理叶片受害严重。在野外条件下凤仙花可作为指示臭氧污染的指示植物<sup>[59]</sup>。野生番茄种(*Lycopersicon pimpinellifolium*)在生长早期对臭氧特别敏感,在50 nL/L臭氧下暴露3 h后即出现典型的褪绿斑,随着臭氧浓度的变化有不同的症状出现,如红色坏死斑、红褐色坏死斑,可以作为臭氧指示植物<sup>[60]</sup>。

## 7 园艺生产中臭氧污染的防治

随着我国空气背景臭氧浓度的升高以及臭氧污染的频发,园艺生产面临严重威胁,因此需要探索和总结臭氧污染的防治方法。首先,应该较准确的确定影响我国重要园艺作物生长、发育、产量及品质的臭氧浓度阈值。低于阈值的臭氧污染对园艺生产影响不大,可以忽略;高于阈值时,应当引起重视,根据情况采取不同的防治方法。

国外学者在确定影响作物的关键臭氧浓度上做了很多研究,一般通过臭氧暴露累积浓度(AOT40,即超过40 nL/L的臭氧暴露累积)和臭氧剂量累积浓度(POD6,

即超过  $6 \text{ nmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  的臭氧剂量累积)确定臭氧效应。有学者将 AOT40 累积达到  $6 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$  作为番茄的臭氧受害阈值浓度<sup>[49]</sup>。而当臭氧剂量累积浓度 POD6 为  $2 \text{ mmol}/\text{m}^2$  时,番茄产量会降低 5%<sup>[61]</sup>。为了确定臭氧关键浓度,有学者在意大利和西班牙开展了 7 个试验,以其结果作为气孔导度模型的参数,并确定了番茄产量及质量与臭氧暴露浓度和臭氧剂量浓度的关系。将带有置信区间的臭氧关键浓度进行了设定,获得了很好的结果。置信区间提供了数据的质量信息,在以后的模型计算中应该考虑进去<sup>[62]</sup>。

当臭氧浓度高于作物的阈值浓度时,为了减少园艺作物产量和品质损失需要及时进行治疗。从根本上来讲,臭氧污染防治应该从源头抓起,在臭氧污染高发季节,控制臭氧前体物浓度如  $\text{NO}_x$ 、VOCs 等。除了减少工业及交通源的  $\text{NO}_x$  之外,还可以通过控制 VOCs 的排放来减少臭氧污染发生的风险。例如可以用 VOCs 排放量低的植物(品种)来替代高排放量的植物(品种)<sup>[63]</sup>。当臭氧污染发生已不可避免时,经常采用以下方式减少其对园艺作物的影响:喷施具有保护作用的化学试剂;对园艺作物进行抗性锻炼;通过其它胁迫提高园艺作物的抗性。20 世纪 70 年代就有学者试图找到能够保护植物免受臭氧胁迫的化学试剂。富莱克斯 13[N-(1,3-二甲基丁基)-N'-苯基对苯二胺]是在橡胶制品中应用的抗氧化防老剂,将其喷施在臭氧胁迫下的苹果幼苗和甜瓜叶片上可以减少可见臭氧伤害<sup>[64]</sup>。臭氧胁迫下,苹果幼苗叶片喷施抗氧化剂二苯胺或抗蒸腾剂 Wilt Pruf,能够减少叶片可见伤害和组织损伤,而且这 2 种化合物联合喷施的保护效果更佳<sup>[13]</sup>。6-苄氨基嘌呤或激动素使  $100 \text{ nL}/\text{L}$  臭氧污染下的矮菜豆叶绿素损失得到缓解并促进了叶片生长<sup>[65]</sup>。苋苋能够缓解臭氧对番茄叶片叶绿素荧光参数造成的不利影响,甘露醇作为活性氧清除剂也能够缓解臭氧对番茄的不利影响<sup>[66]</sup>。乙烯叉二脲(EDU)经常被用于提高农林作物的抗臭氧能力,这方面有大量的报道<sup>[67]</sup>,但是 EDU 对园艺作物影响的研究还较少。有学者研究发现,臭氧胁迫下喷施 EDU 的番茄植株的表现优于没有喷施的植株,但喷施 EDU 对于植株不同器官具有不同的效果<sup>[68]</sup>。苯菌灵也能够缓解臭氧对植物的不利影响。臭氧污染下番茄植株喷施苯菌灵阻止了叶片膜质过氧化物的发生,增加了对光系统 II 的保护,光系统 II 电子传递和反应中心开放比例增加<sup>[69]</sup>。有学者研究了番茄愈伤组织提前进行臭氧暴露对再生植株臭氧抗性的影响。200  $\text{nL}/\text{L}$  臭氧预处理的愈伤组织再生出的幼苗在急性臭氧污染下表现出更好的适应能力,具有较低的过氧化氢含量,以及较低的抗氧化酶(SOD 和 POD)活性,还可以通过促进可溶性苯酚含量,提高叶片及质外体抗坏血酸含量,增加去氢抗坏

血酸还原酶及谷胱甘肽含量来提高抗臭氧能力<sup>[70]</sup>。臭氧主要通过叶片气孔进入植物体,因此,能够调节气孔导度的环境因子可能会间接减少植物的臭氧吸收量、缓解臭氧伤害。另外,一些非生物胁迫能激活植物体内抗氧化物质的合成,进而清除掉臭氧产生的活性氧等有毒物质。有学者研究了盐胁迫和臭氧对番茄生理指标及最终产量的影响,发现盐胁迫能够使植物的臭氧伤害减轻<sup>[71]</sup>。

## 8 展望

作为全球环境变化的重要方面,空气臭氧浓度呈上升趋势,许多国家和地区臭氧污染频发。园艺作物生产受到臭氧污染的严重威胁。文章针对臭氧污染对园艺作物影响的相关研究进行了总结和归纳。与农作物相比,国内外针对臭氧胁迫对园艺作物影响的研究还比较少,特别是国内相关研究很少,研究力量很薄弱,亟待加强。为了积极应对臭氧污染,认为需要从以下几个方面加强研究。

一是臭氧导致的叶片可见伤害有时与其它生物或非生物胁迫,例如元素缺乏等造成的症状相似,有时需要较丰富的专业经验来判断,甚至有时还需要借助显微镜来观察。如何快速简便地区分臭氧污染与其它胁迫造成的可见伤害还需深入研究解决。建议针对我国种植面积大、经济价值高、生长发育期在臭氧污染高发时期的园艺作物进行系统性的可见伤害研究,并建立彩色图谱,以供生产者参考。

二是对作物臭氧抗性机理的研究还不够深入,针对臭氧污染开展的定向育种研究还很缺乏。建议通过 QTL 分析和分子标记辅助选择等方法来评价作物新品种的臭氧敏感性<sup>[46]</sup>,利用常规杂交或转基因等育种方法,在不影响产量和品质的前提下,选育对臭氧污染高抗的园艺作物品种。

三是园艺作物中有些种类具有较高的观赏价值,可以用于庭院和道路绿化,适合用作环境指示植物。但是这方面的研究还比较缺乏,需要进一步筛选具有较好的臭氧敏感性和特异性的观赏植物种类或品种。

四是臭氧污染发生后,如何进行有效防治以减少产量或品质损失,还需要加强研究。建议加大对低成本无公害抗臭氧药剂的研发力度,研究灌溉、施肥等栽培措施对缓解臭氧胁迫的作用。

## 参考文献

- [1] JAFFE D, RAY J. Increase in surface ozone at rural sites in the western US[J]. Atmospheric Environment, 2007, 41: 5452-5463.
- [2] DERWENT R, COLLINS W, JOHNSON C, et al. Viewpoint: global ozone concentrations and regional air quality[J]. Environmental Science and Technology, 2002, 36: 379-382.
- [3] SOLOMON S, QIN D, MANNING M, et al. Contribution of working group I to the fourth annual assessment report of the intergovernmental panel

- on climate change[M]. Climate change 2007: the physical science basis. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007: 996.
- [4] KRUPA S, MCGRATH M T, ANDERSON A H, et al. Ambient ozone and plant health[J]. Plant Disease, 2001, 85: 4-12.
- [5] VLACHOKOSTAS C, NASTIS S A, ACHILLAS C, et al. Economic damages of ozone air pollution to crops using combined air quality and GIS modeling[J]. Atmospheric Environment, 2010, 44: 3352-3361.
- [6] AVNERY S, MAUZERALL D L, LIU J F, et al. Global crop yield reductions due to surface ozone exposure: 1. Year 2000 crop production losses and economic damage[J]. Atmospheric Environment, 2011, 45: 2284-2296.
- [7] SNYDER R G, SIMON J E, REINERT R A, et al. Effects of air quality on foliar injury, growth, yield, and quality of muskmelon[J]. Environmental Pollution, 1988, 53: 187-196.
- [8] DECOTEAU D R, SIMON J E, EASON G, et al. Ozone-induced injury of field-grown watermelons[J]. Hortscience, 1986, 21: 1369-1371.
- [9] FENG Z Z, SUN J S, WAN W X, et al. Evidence of widespread ozone-induced visible injury on plants in Beijing, China[J]. Environmental Pollution, 2014, 193: 296-301.
- [10] FINDLEY D A, KEEVER G J, CHAPPELKA A H, et al. Differential response of buddleia (*Buddleia davidii* Franch.) to ozone[J]. Environmental Pollution, 1997, 98: 105.
- [11] CALVO E, MARTIN C, SANZ M J. Ozone sensitivity differences in five tomato cultivars: visible injury and effects on biomass and fruits[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2007, 186: 167-181.
- [12] ZHAO Y, BELL J N B, WAHID A, et al. Inter- and intra-specific differences in the response of chinese leafy vegetables to ozone[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2011, 216: 451-462.
- [13] ELFVING D C, GILBERT M D, EDGERTON L J, et al. Antioxidant and antitranspirant protection of apple foliage against ozone injury[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 1976, 15: 336-341.
- [14] SCEBBA F, SOLDATINI G, RANIERI A. Ozone differentially affects physiological and biochemical responses of two clover species: *Trifolium repens* and *Trifolium pratense*[J]. Environmental Pollution, 2003, 123: 209-216.
- [15] COOLEY D R, MANNING W J. The impact of ozone on assimilate partitioning in plants: a review[J]. Environmental Pollution, 1987, 47: 95-113.
- [16] THWE A A, VERCAMBRE G, GAUTIER H, et al. Dynamic shoot and root growth at different developmental stages of tomato (*Solanum lycopersicum* Mill.) under acute ozone stress[J]. Scientia Horticulturae, 2013, 150: 317-325.
- [17] KEUTGEN A J, NOGA G, PAWELZIK E. Cultivar-specific impairment of strawberry growth, photosynthesis, carbohydrate and nitrogen accumulation by ozone[J]. Environmental and Experimental Botany, 2005, 53: 271-280.
- [18] KEUTGEN N, KEUTGEN A J, JANSSENS M J. Sweet potato [*Ipomoea batatas* (L.) Lam.] cultivated as tuber or leafy vegetable supplier as affected by elevated tropospheric ozone[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56: 6686-6690.
- [19] 郭建平, 王春乙, 温民, 等. 大气中臭氧浓度变化对蔬菜的影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(2): 18-20.
- [20] SUDHAKAR N, NAGENDRA-PRASAD D, MOHAN N, et al. A preliminary study on the effects of ozone exposure on growth of the tomato seedlings[J]. Australian Journal of Crop Science, 2008, 2: 33-39.
- [21] FISCUS E L, BOOKER F L, BURKEY K O. Crop responses to ozone: uptake, modes of action, carbon assimilation and partitioning[J]. Plant, Cell and Environment, 2005, 28: 997-1011.
- [22] TENGA A Z, ORMROD D P. Diminished greenness of tomato leaves exposed to ozone and post-exposure recovery of greenness[J]. Environmental Pollution, 1990, 64: 29-41.
- [23] FLOWERS M D, FISCUS E L, BURKEY K O, et al. Photosynthesis, chlorophyll fluorescence, and yield of snap bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes differing in sensitivity to ozone[J]. Environmental and Experimental Botany, 2007, 61: 190-198.
- [24] THWE A A, VERCAMBRE G, GAUTIER H, et al. Response of photosynthesis and chlorophyll fluorescence to acute ozone stress in tomato (*Solanum lycopersicum* Mill.)[J]. Photosynthetica, 2014, 52: 105-116.
- [25] DEGL'INNOCENTI E, GUIDI L, SOLDATINI G F. Effects of elevated ozone on chlorophyll fluorescence in symptomatic and asymptomatic leaves of two tomato genotypes[J]. Biologia Plantarum, 2007, 51: 313-321.
- [26] DEGL'INNOCENTI E, CASTAGNA A, RANIERI A, et al. Combined effects of cadmium and ozone on photosynthesis of *Lycopersicon esculentum* [J]. Photosynthetica, 2014, 52: 179-185.
- [27] 王勋陵, 郭清霞. 臭氧对倒挂金钟和蚕豆呼吸作用的影响[J]. 环境科学, 1990, 11(2): 31-33.
- [28] 黄韵珠, 王勋陵. 臭氧对辣椒不同发育时期光合作用的影响[J]. 农业环境保护, 1991, 10(2): 60-63.
- [29] WOHLGEMUTH H, MITTELSTRASS K, KSCHIESCHAN S, et al. Activation of an oxidative burst is a general feature of sensitive plants exposed to the air pollutant ozone[J]. Plant, Cell and Environment, 2002, 25: 717-726.
- [30] PIRKER K F, REICHENAUER T G, PASCUAL E C, et al. Steady state levels of free radicals in tomato fruit exposed to drought and ozone stress in a field experiment[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2003, 41: 921-927.
- [31] BORTOLIN R C, CAREGNATO F F, DIVAN A M, et al. Effects of chronic elevated ozone concentration on the redox state and fruit yield of red pepper plant *Capsicum baccatum* [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2014, 100: 114-121.
- [32] KÖLLNER B, KRAUSE G H M. Effects of two different ozone exposure regimes on chlorophyll and sucrose content of leaves and yield parameters of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) and rape (*Brassica napus* L.) [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2003, 144: 317-332.
- [33] YOON H S, LEE H, LEE I A, et al. Molecular cloning of the monodehydroascorbate reductase gene from *Brassica campestris* and analysis of its mRNA level in response to oxidative stress[J]. Biochimica et Biophysica Acta, 2004, 1658: 181-186.
- [34] BACCIO D D, EDERLI L, MARABOTTINI R, et al. Similar foliar lesions but opposite hormonal patterns in a tomato mutant impaired in ethylene perception and its near isogenic wild type challenged with ozone[J]. Environmental and Experimental Botany, 2012, 75: 286-297.
- [35] CASTAGNA A, EDERLI L, PASQUALINI S, et al. The tomato ethylene receptor LE-ETR3 (NR) is not involved in mediating ozone sensitivity; causal relationships among ethylene emission, oxidative burst and tissue damage[J]. New Phytologist, 2007, 174: 342-356.
- [36] MOEDER W, BARRY C S, TAURIANEN A A, et al. Ethylene synthesis regulated by biphasic induction of 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid synthase and 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid oxidase genes is required for hydrogen peroxide accumulation and cell death in ozone-exposed tomato[J]. Plant Physiology, 2002, 130: 1918-1926.
- [37] MARCO F, CALVO E, CARRASCO P, et al. Analysis of molecular markers in three different tomato cultivars exposed to ozone stress[J]. Plant Cell Reports, 2008, 27: 197-207.
- [38] CUI H, SUN Y, SU J, et al. Elevated O<sub>3</sub> reduces the fitness of *Bemisia*

- tabaci* via enhancement of the SA-dependent defense of the tomato plant[J]. Arthropod-Plant Interactions, 2012(6):425-437.
- [39] CHAPPELKA A. Reproductive development of blackberry (*Rubus cuneifolius*), as influenced by ozone[J]. New Phytologist, 2002, 155:249-255.
- [40] GIMENO B S, BERMEJO V, REINERT R A, et al. Adverse effects of ambient ozone on watermelon yield and physiology at a rural site in eastern Spain[J]. New Phytologist, 1999, 144:245-260.
- [41] 荆世杰, 陈年来, 徐常青, 等. 臭氧对温室土壤化学性质和甜瓜产量的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2008, 43(3):93-97.
- [42] YOUNGLOVE T, MCCOOL P M, MUSSELMAN R C, et al. Growth-stage dependent crop yield response to ozone exposure[J]. Environmental Pollution, 1994, 86:287-295.
- [43] SOJA G, REICHENAUER T G, EID M, et al. Long-term ozone exposure and ozone uptake of grapevines in open-top chambers[J]. Atmospheric Environment, 2004, 38:2313-2321.
- [44] BOOKER F, MUNTIFERING R, MCGRATH M, et al. The ozone component of global change: potential effects on gricultural and horticultural plant yield, product quality and interactions with invasive species[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2009, 4:337-351.
- [45] VANDERMEIREN K, BOCK M D, HOREMANS N, et al. Ozone effects on yield quality of spring oilseed rape and broccoli[J]. Atmospheric Environment, 2012, 47:76-83.
- [46] OLLERENSHAW J H, LYONS T, BARNES J D. Impacts of ozone on the growth and yield of field-grown winter oilseed rape[J]. Environmental Pollution, 1999, 104:53-59.
- [47] MILLS G, BUSE A, GIMENO B, et al. A synthesis of AOT40-based response functions and critical levels of ozone for agricultural and horticultural crops[J]. Atmospheric Environment, 2007, 41:2630-2643.
- [48] FINDLEY D A, KEEVER G J, CHAPPELKA A, et al. Ozone sensitivity of selected southeastern landscape plants[J]. Journal of Environmental Horticulture, 1997, 15:51.
- [49] MANNINEN S, SIIVONEN N, TIMONEN U, et al. Differences in ozone response between two Finnish wild strawberry populations[J]. Environmental and Experimental Botany, 2003, 49:29-39.
- [50] ZHANG L, XU H, YANG J C, et al. Photosynthetic characteristics of diploid honeysuckle (*Lonicera japonica* Thunb.) and its autotetraploid cultivar subjected to elevated ozone exposure[J]. Photosynthetica, 2010, 48:87-95.
- [51] BISWAS D K, XU H, LI Y G, et al. Genotypic differences in leaf biochemical, physiological and growth responses to ozone in 20 winter wheat cultivars released over the past 60 years[J]. Global Change Biology, 2008, 14:46-59.
- [52] KOUTERICK K B, SKELLY J M, FREDERICKSEN T S, et al. Foliar injury, leaf gas exchange and biomass responses of black cherry (*Prunus serotina* Ehrh.) half-sibling families to ozone exposure[J]. Environmental Pollution, 2000, 107:117-126.
- [53] BURKEY K O, WEI C, PALMER G, et al. Antioxidant metabolite levels in ozone-sensitive and tolerant genotypes of snap bean[J]. Physiologia Plantarum, 2000, 110:195-200.
- [54] GUIDI L, DEGL'INNOCENTI E, GENOVESI S, et al. Photosynthetic process and activities of enzymes involved in the phenylpropanoid pathway in resistant and sensitive genotypes of *Lycopersicon esculentum* L. exposed to ozone[J]. Plant Science, 2005, 168:153-160.
- [55] FERDINAND J A, FREDERICKSEN T S, KOUTERICK K B, et al. Leaf morphology and ozone sensitivity of two open pollinated genotypes of black cherry (*Prunus serotina*) seedlings[J]. Environmental Pollution, 2000, 108:297-302.
- [56] SCHAUB M, SKELLY J M, STEINER K C, et al. Physiological and foliar injury responses of *Prunus serotina*, *Fraxinus americana*, and *Acer rubrum* seedlings to varying soil moisture and ozone[J]. Environmental Pollution, 2003, 124:307-320.
- [57] BURKEY K O, MILLER J E, FISCUS E L. Assessment of ambient ozone effects on vegetation using snap bean as a bioindicator species[J]. Journal of Environmental Quality, 2005, 34:1081-1086.
- [58] BURKEY K O, BOOKER F L, AINSWORTH E A, et al. Field assessment of a snap bean ozone bioindicator system under elevated ozone and carbon dioxide in a free air system[J]. Environmental Pollution, 2012, 166:167-171.
- [59] OGUNTIMEHIN I, KONDO H, SAKUGAWA H. The use of *Impatiens* spp.) as a bioindicator of some simulated air pollutants-Using an ornamental plant as bioindicator[J]. Chemosphere, 2010, 81:273-281.
- [60] IRITI M, BELLI L, NALI C, et al. Ozone sensitivity of currant tomato (*Lycopersicon pimpinelli folium*), a potential bioindicator species[J]. Environmental Pollution, 2006, 141:275-282.
- [61] MILLS G, PLEIJEL H, BRAUN S, et al. New stomatal flux-based critical levels for ozone effects on vegetation[J]. Atmospheric Environment, 2011, 45:5064-5068.
- [62] GONZÁLEZ-FERNÁNDEZ I, CALVO E, GEROSA G, et al. Setting ozone critical levels for protecting horticultural Mediterranean crops: Case study of tomato[J]. Environmental Pollution, 2014, 185:178-187.
- [63] KIM K J, KIM Y J, MA Y I, et al. A modeling study of the impact of natural and urban forest on ambient ozone[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2008, 25:483-492.
- [64] GILBERT M D, ELFVING D C, LISK D J. Protection of plants against ozone injury using the antiozonant N-(1,3-Dimethylbutyl)-N'-Phenyl-p-Phenylenediamine[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 1977, 18:783-786.
- [65] RONECKLES V C, RESH H M. Effects of cytokinins on responses of bean leaves to chronic ozone treatment[J]. Atmospheric Environment, 1975, 9:749-753.
- [66] OGUNTIMEHIN I, EISSA F, SAKUGAWA H. Simultaneous ozone fumigation and fluoranthene sprayed as mists negatively affected cherry tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill)[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2010, 73:1028-1033.
- [67] FENG Z, WANG S, SZANTOI Z, et al. Protection of plants from ambient ozone by applications of ethylenediurea (EDU): A meta-analytic review[J]. Environmental Pollution, 2010, 158:3236-3242.
- [68] VARSHNEY C K, ROUT C. Ethylene diurea (EDU) protection against ozone injury in tomato plants at Delhi[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 1998, 61:188-193.
- [69] CALATAYUD A, BARRENO E. Chlorophyll a fluorescence, antioxidant enzymes and lipid peroxidation in tomato in response to ozone and benomyl[J]. Environmental Pollution, 2001, 115:283-289.
- [70] NAGENDRA-PRASAD D, SUDHAKAR N, MURUGESAN K, et al. Pre-exposure of calli to ozone promotes tolerance of regenerated *Lycopersicon esculentum* cv. PKM1 plantlets against acute ozone stress[J]. Journal of Plant Physiology, 2008, 165:1288-1299.
- [71] MAGGIO A, PASCALE S D, FAGNANO M, et al. Can salt stress-induced physiological responses protect tomato crops from ozone damages in Mediterranean environments? [J]. European Journal of Agronomy, 2007, 26:454-461.

# 中国“倒春寒”天气的发生及对 树木春季生长影响

王梓<sup>1</sup>, 徐军亮<sup>1</sup>, 魏红旭<sup>2</sup>

(1. 河南科技大学 林学院, 河南 洛阳 471003; 2. 中国科学院 东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130102)

**摘要:**近年来,随着气候变化而产生的“倒春寒”天气迹象日趋明显,然而中国尚未完全掌握其对农业生态系统的危害原理,尤其有关树木生长方面的信息反馈十分有限。资料显示:中国对“倒春寒”的关注始于1975年,但主要研究区主要集中于中国西南地区,因此目前尚缺乏全国尺度上的把握;研究内容方面国内侧重“倒春寒”的大气成因及其对农作物冻害的评估,有关树木受害的关注度明显不足,相反国外研究更加注重探讨“倒春寒”对森林生态系统的影响方面并且已经取得了一定的进展;在“倒春寒”对植物的冻害机制方面,中国研究更倾向于“持续低温”和“气温骤降”的影响,而国外则认为是在全球变暖作用下植物物候提前所致。通过国外有关树木的研究结论对中国全境尺度春季温度数据进行分析后,发现近年来“倒春寒”很有可能已经给中国树木的春季生长造成了严重影响,希望引起同行们对此问题的重视。

**关键词:**“倒春寒”;全球变化;气温波动;低温冻害;春季高温

**中图分类号:**S 761.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2015)16-0195-07

当前随着全球城市化的快速推进,以人类活动为主要驱动因子的土地利用方式的转变和城市面积的不断

**第一作者简介:**王梓(1982-),女,河南新乡人,博士,讲师,现主要从事植物水分生理及植物抗性等工作。E-mail:wang\_zi\_xx@126.com.

**责任作者:**魏红旭(1983-),男,吉林人,博士,助理研究员,现主要从事城市森林与苗木生理生态学等工作。E-mail:Weihongxu@iga.ac.cn.

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(41401063)。

**收稿日期:**2015-05-18

扩张正在导致气候在全球范围内不断发生着变化<sup>[1]</sup>。全球气候变化导致极端天气事件在全球范围内愈加频发,诸如暴雨、干旱、冻害、热浪等极端天气发生的强度也随之不断攀升,已经给全球生态系统造成了严重破坏,但是预计未来这种破坏作用还将继续加强<sup>[2]</sup>。在大气CO<sub>2</sub>浓度激增的背景之下全球温度变暖的趋势已成不争的事实<sup>[3]</sup>,因此以发芽和开花为标志的春季物候也随之悄然提前<sup>[4-6]</sup>,同时春季温度的异常波动逐渐频繁<sup>[7-8]</sup>,因此一旦春季温度骤降至0℃以下时植物遭受“倒春寒”冻害的几率大大增加<sup>[5,8-10]</sup>。近年来,随着“倒

## Research on the Effect of Ozone Pollution on Horticultural Crops

ZHANG Lu, JIA Lili, SUI Jiaxin, ZHANG Yue, CHEN Yajun

(College of Horticulture, Northeast Agricultural University, Harbin, Heilongjiang 150030)

**Abstract:** As one of the major pollutants in the tropospheric air, ozone seriously impaired human health, animals and plants' growth and development. In this paper, the emergence and development of ozone pollution were systematically summarized. Impacts of ozone on leaf visible symptom, growth and physiological parameters, blossom and fruiting, yield and product quality in horticultural crops were summed up. Differences of ozone sensitivity among horticultural crops and the underling mechanisms were investigated. Plant screening criteria for ozone indicator and its application potential were discussed. Methods and approaches for preventing and mitigating ozone damage were generalized. In the end, future prospect was made for responses of horticultural crops to ozone stress.

**Keywords:** ozone; horticultural crops; review